
ESTUDIO DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ACÚSTICA EN ESPACIOS COMUNES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DE ZARAGOZA

Trabajo Fin de Grado



**Universidad
Zaragoza**

Hugo Latorre Cortés

Dpto. Física Aplicada - Universidad de Zaragoza

Índice

0.- Introducción	1
1.- Objetivos	1
2.- Marco teórico	2
2.1- Física del sonido	2
2.2- Ponderado de frecuencias y la corrección asociada	3
2.3- Otras correcciones	6
2.4- Parámetros de interés	7
2.5- Evaluación de la respuesta humana al sonido	8
3.- Marco legal	9
3.1- Legislación pertinente	10
3.2- Definiciones	10
3.3- Estándares internacionales (normativa ISO)	11
4.- Marco técnico	12
4.1- Aparato de medida	12
4.2- Software y tratamiento de datos. Puesta a punto	13
4.3- Criterio de eventos aislados	16
5.- Marco práctico	17
5.1- Elección de espacios	17
5.2- Proceso de medida y algunas consideraciones	18
5.3- Resultados	20
5.4- Análisis y conclusiones	22
6.- Bibliografía	25

0 Introducción

Este Trabajo Fin de Grado se desarrolla en el campo de la acústica, que corresponde a la física aplicada y se centra en el estudio del sonido. Dentro de este estudio se incluye tanto su propagación como el efecto que produce sobre las personas.

Se empieza asentando el contexto teórico y puramente físico que concierne al trabajo, que es la mecánica de ondas, para poder definir las magnitudes y escalas con las que se trabaja el sonido en la práctica.

A continuación, se pone de manifiesto la importancia que tiene este campo en la legislación pertinente al bienestar y al medio ambiente. Esto hace evidente la necesidad de controlar la emisión del sonido en situaciones y entornos de especial sensibilidad.

Por último, se presentan una serie de medidas realizadas en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Zaragoza. Estas medidas se toman con el instrumental típico que se emplea tanto dentro como fuera del ámbito científico para cubrir la parte experimental de la acústica.

1 Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es recrear los procesos de medida que pueden llevarse a cabo en la evaluación del ruido ambiente, haciendo esto en la Facultad de Ciencias. De esta manera se tratará de profundizar en un campo de la física aplicada que prácticamente no está presente en el programa del grado.

Partiendo de la limitación que supone trabajar con un único receptor, se buscará estudiar y comparar acústicamente distintos espacios de la facultad. A partir de los resultados, se buscará extraer las conclusiones que sea posible y juzgar las características acústicas de los distintos espacios.

Adicionalmente se propondrán, en base a experiencias pasadas, situaciones en las que puede haber un interés particular por tomar este tipo de medidas y que no pueden llevarse a cabo para hacer este trabajo dadas las limitaciones de las que se parte. Debe tenerse en cuenta que este trabajo es puramente académico, y algunos de los procedimientos que se seguirían en un entorno profesional quedan completamente fuera de alcance.

2 Marco teórico

Cuando hablamos de sonido o de ruido, nos referimos a cualquier onda de presión que viaja por un medio apto para tal fenómeno de propagación. Desde el punto de vista de la física clásica, es necesario que el medio cuente con una cantidad de partículas suficiente que permita cambios de presión locales significativos. Estos cambios de presión caracterizan a estas ondas, siendo responsables de la propagación de las mismas.

La atmósfera es un medio gaseoso apto, y es fundamental a la hora de construir modelos de propagación. No obstante, no es el único, ya que otros medios con mayor densidad de partículas (sólidos) también son capaces de propagar este tipo de ondas. Es especialmente necesario considerar estos otros medios, junto con la atmósfera, a la hora de trabajar con el sonido en zonas urbanas y evaluarlo. Esto último se aplica tanto a espacios interiores como exteriores, siendo el caso primero el que concierne a este trabajo.

Cuando hablemos de ruido, nos estaremos refiriendo al conjunto de todas las ondas de presión (*sonido* de ahora en adelante) emitidas por distintas fuentes en un entorno, incluyendo sus reflexiones y refracciones, y que se manifiestan conjuntamente en los distintos puntos de dicho entorno con una cierta intensidad. Los receptores colocados en un espacio son capaces de medir la intensidad en un cierto punto.

El cálculo de esta intensidad se puede llevar a cabo mediante métodos de cálculo numéricos, a cuya existencia se hará mención en este trabajo más adelante. Para realizar la parte práctica del trabajo se medirán las intensidades directamente con el aparato de medida pertinente. La escala utilizada para estas medidas es logarítmica y su unidad es el decibelio [dB], que será lo primero que se defina tras recordar los aspectos teóricos básicos del sonido.

2.1 Física del sonido

La ecuación que gobierna la propagación del sonido es la ecuación de ondas clásica, con los parámetros característicos de una onda de presión.

$$\nabla^2 P(\vec{r}, t) = \frac{1}{v_s^2} \frac{\partial^2 P(\vec{r}, t)}{\partial t^2} \quad v_s = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho} \right)_0 \quad (2.1)$$

En esta ecuación, v_s es la velocidad del sonido y está relacionada con la variación de la presión respecto a la densidad del medio en condiciones normales.

Centrándonos en el caso unidimensional, las soluciones a la Ec(2.1) son de la forma

$$P(x, t) = f(x - v_s t) + g(x + v_s t) \quad (2.2)$$

Esta solución es la parte real de

$$P(x, t) = A e^{i(\omega t - kx)} \quad k = \omega/v_s \quad (2.3)$$

Este resultado es fácilmente extrapolable al caso tridimensional. Utilizando el vector de ondas y la posición correspondientes:

$$P(\vec{r}, t) = A e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})} \quad (2.4)$$

El nivel de presión sonora en un punto se puede calcular integrando para un cierto intervalo de tiempo (tiempo de integración) y tomando un cierto valor de presión como referencia¹

$$L_T = 10 \cdot \log \left\{ \left[\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt \right] / p_0^2 \right\} [dB] \quad (2.5)$$

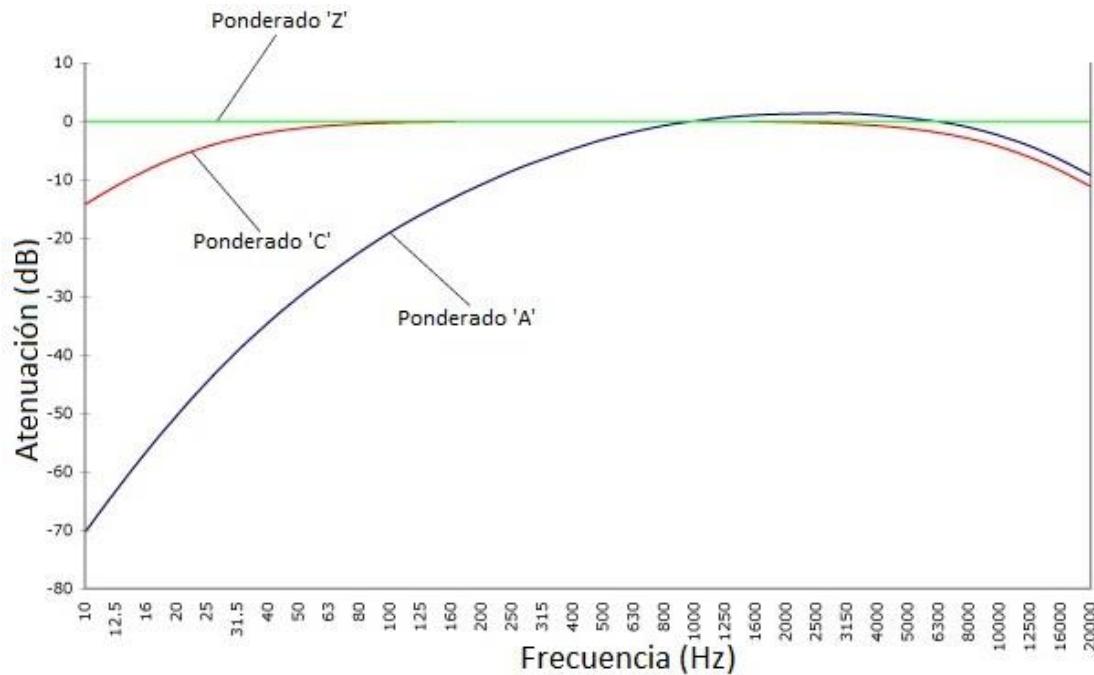
La presión de referencia es $P_0 = 20 \mu Pa$ en el aire.

2.2 Ponderado de frecuencias y la corrección asociada

Para que las medidas que se realizan gocen de un cierto rigor es necesario considerar el sesgo que introduce el oído humano a las distintas frecuencias del espectro audible. El intervalo entre 500Hz y 6.000Hz es mucho más eficiente a la detección por parte de nuestro oído, mientras que las frecuencias fuera de ese intervalo se perciben cada vez peor hasta llegar a las que dejan de ser escuchadas.

El problema se resuelve ponderando por frecuencias, lo que supone integrar a todo el espectro de frecuencias. Para esto se utiliza una función de ponderado que contemple esta dependencia que tiene el nivel de ruido correspondiente a un sonido con las distintas frecuencias que lo componen.

¹ Fco. Javier Martínez Gómez, Curso de control de ruido y vibraciones, Zaragoza marzo/abril de 2003, Asociación de ingenieros industriales de Aragón - CBR 74



Fig(2.1) – Ponderados más comunes en la actualidad. Atenuación en función de frecuencia.

Los ponderados para frecuencias más utilizados son el A y el C. Existen otros, están en su mayoría obsoletos y en la actualidad todas las medidas de ruido de carácter aplicado se realizan con uno de estos dos ponderados.

-*Ponderado A*: está específicamente definido para asemejarse lo máximo posible a la respuesta real del oído humano.

-*Ponderado C*: se utiliza normalmente para realizar medidas de pico de presión sonora y altas frecuencias, las cuales atenúa menos.

El tipo de ponderación utilizado se especifica en las unidades de la magnitud medida, siendo $dB(A)$ y $dB(C)$, respectivamente.

La necesidad de emplear estas curvas (ver Fig(2.1)²) es consecuencia directa de admitir que los receptores no son perfectos. La corrección se puede aplicar sobre un cálculo numérico cualquiera supuesto que se conoce la curva de ponderado correspondiente al receptor teórico. Para determinar esta curva de manera experimental lo ideal sería disponer de un receptor perfecto que se usaría como patrón y que permitiese comparar las medidas en cada frecuencia.

² <https://www.cirrusresearch.co.uk/blog/2011/08/what-are-a-c-z-frequency-weightings/>

Banda	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Freq. Nominal (Hz)	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
A _f (dB)	-39,4	-26,2	-16,1	-8,6	-3,2	0	+1,2	+1,0	-1,1

Tabla(2.1) – Bandas de octava que intervienen en las medidas de este trabajo.

A nivel de cálculo, esto es una simple corrección que requiere de un término extra que se suma a la contribución de cada frecuencia al determinar el nivel de presión sonora. A partir de ahora trabajaremos con ponderado A.

$$L_{fTA} = L_{fT} + A_f \quad (2.6)$$

Intervienen el nivel de presión sonora medido para una cierta frecuencia y la corrección correspondiente a la misma. En la práctica se utilizan las llamadas bandas de octava o bandas de frecuencia, que permiten emplear la misma corrección en una serie de frecuencias correspondientes a la misma banda. Esto se hace así porque sumar unos pocos términos es muchísimo más rápido que integrar a todo un espectro de frecuencias y la imprecisión introducida es irrelevante.

Existen también las bandas de media octava y tercio de octava, que introducen mayor precisión, pero no son tan comunes. Esencialmente dividen las octavas para asignar valores más concretos a cada intervalo. En este trabajo se utilizan octavas completas ya que no tenemos acceso a mayor precisión por cuestiones del propio instrumento de medida.

El cálculo de L_{fT} es el especificado en la Ec(2.5). La obtención de un valor numérico global se lleva a cabo con la siguiente expresión:

$$L_{AT} = 10 \cdot \log \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\sum_{j=0}^8 10^{0,1 \cdot [L_{fT(ij)} + A_f(j)]} \right] \right\} [dBA] \quad (2.7)$$

El sumatorio en i corresponde a las distintas fuentes que intervienen, si las hubiera. De no haberlas se puede prescindir de él. El sumatorio en j corresponde a las nueve bandas de octava que serán relevantes al medir y que vienen especificadas en la *Tabla(1.1)*³. Estas bandas son las que define

³ Enrique J. Sanchís peris, Diploma de Especialización Profesional Universitario en Medición de la Contaminación Acústica, Universidad de Valencia - Vol.2, pág68

la normativa ISO en sus textos pertinentes al ruido ambiental, a los cuales se hará mención más adelante.

La operación especificada no es más que el promedio logarítmico de los distintos niveles corregidos que se asocian a cada banda de frecuencia

Los instrumentos de medida homologados que se utilizan en la actualidad tienen ya incorporadas las curvas de ponderado más comunes. Generalmente se limitan a los ponderados de mayor interés práctico, que serían A y C, permitiendo alternar entre los mismos.

Cabe destacar que la obtención de estas curvas no es un problema trivial, y en el caso del ponderado A no es posible recurrir a métodos puramente físicos. Nuestro oído es un tipo de receptor muy particular y es fundamentalmente distinto de cualquier instrumento que pueda emplearse para medir.

El oído está sujeto a un componente de interpretación subjetiva que escapa a los valores numéricos que devuelven los receptores. Se necesita recurrir a métodos psicofísicos para evaluar la respuesta humana al sonido y traducirla a una corrección que se pueda aplicar de forma práctica sobre cualquier medida realizada. Este proceso se describe brevemente en el apartado correspondiente a la respuesta humana al sonido.

2.3 Otras correcciones

Existen más tipos de correcciones, como pueden ser las correcciones por directividad o por condiciones meteorológicas. Se incorporan a la $E_c(2.6)$ como un término sumado, de forma análoga a la corrección de oído. La complicación reside, de nuevo, en encontrar un buen método para poder calcularlas.

No vamos a dar demasiada importancia a estas contribuciones dado que no se pretende realizar ningún cálculo teórico. Tan solo era conveniente mencionar las curvas de ponderado debido al papel fundamental que juegan en las medidas de ruido y su incorporación explícita en la instrumentación.

Es importante notar que al trabajar en interiores no existe un efecto directo de la meteorología. A la directividad se hará mención más adelante en el marco práctico del trabajo.

2.4 Parámetros de interés

Una vez se han aplicado las correcciones pertinentes, los datos a evaluar consisten en una serie de niveles de presión sonora que se han calculado integrando para intervalos de tiempo cortos (generalmente un segundo o medio segundo) y que permiten contemplar la evolución temporal.

A continuación, se definen una serie de parámetros de interés pertinentes a la evaluación de los resultados prácticos.

-Nivel de evaluación sonora⁴:

$$L_{RA,T_n} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{n} \sum_i^n 10^{L_{AT_i}/10} \right) [dBA] \quad (2.8)$$

La *R* viene del inglés *rating* (evaluación), la *A* indica que se está usando ponderado A y *T_n* especifica el tiempo de medida o simplemente identifica la medida. En este trabajo usaremos este último subíndice para especificar el lugar de medida. Aquí *n* señala la cantidad de valores registrados.

Este valor numérico es muy útil para evaluar las características acústicas generales de un entorno. Es un promedio logarítmico y por tanto discrimina en favor de aquellos valores que se sitúen más altos en la escala logarítmica.

-Pico de presión sonora

$$L_{AT_nmax} \quad (2.9)$$

-Mínimo de presión sonora:

$$L_{AT_nmin} \quad (2.10)$$

-Promedio aritmético

$$L_{AT_navg} = \frac{1}{T_n} \sum_i L_{AT_i} \quad (2.11)$$

⁴ Fco. Javier Martínez Gómez, Curso de control de ruido y vibraciones, Zaragoza marzo/abril de 2003, Asociación de ingenieros industriales de Aragón - CBR 71

Este promedio es completamente distinto al promedio logarítmico y produce resultados radicalmente distintos. Devuelve un valor que se aproximaría más al nivel de presión más frecuente que aparece en una medida y en cierto modo ayuda a interpretar mejor el nivel de evaluación.

-Resta aritmética:

$$L_{a;b}^{(arit)} = L_a - L_b \quad (2.12)$$

-Resta logarítmica:

$$L_{a;b}^{(log)} = 10 \cdot \log(10^{L_a/10} - 10^{L_b/10}) \quad (2.13)$$

Estas dos restas son fundamentalmente distintas. La primera no depende de qué valores concretos se resten sino de la diferencia absoluta en decibelios, mientras que en la segunda devuelve el nivel de ruido que debería producirse cuando ya existe un nivel b para llegar al nivel a .

2.5 Evaluación de la respuesta humana al sonido

Para evaluar de una manera más acertada la respuesta humana al sonido se introduce el concepto de sonoridad. Este es un parámetro que depende de características tanto fisiológicas como psicológicas. Un aspecto fisiológico que se ha mencionado ya es el cambio en la eficiencia del oído para distintos rangos de frecuencias. Como aspecto psicológico, entrarían en juego intensidad y timbre.

La impresión acústica se evalúa mediante experimentos psicofísicos. Para evaluar la respuesta de una población al ruido ambiente se pueden realizar encuestas⁵, mientras que para tonos concretos se pide a una serie de individuos que comparen varios de éstos.

La sonoridad, calculada experimentalmente para distintas frecuencias e intensidades, evalúa el factor subjetivo del sonido y permite trazar las curvas de ponderado correspondientes.

El uso de escalas logarítmicas para trabajar con el sonido queda justificado de dos maneras distintas, aunque convenientemente complementarias: la primera es de tipo práctico y está relacionada con las cifras que se

⁵ Enrique J. Sanchís peris, Diploma de Especialización Profesional Universitario en Medición de la Contaminación Acústica, Universidad de Valencia - Vol.5, pág36

manejarían usando una escala de presiones. Hay siete órdenes de magnitud entre el umbral de audición ($2 \cdot 10^{-5} Pa$) y el umbral del dolor ($200 Pa$), mientras que con una escala logarítmica nos situamos entre $0 dB$ y $140 dB$.

La segunda justificación es de carácter fisiológico y está relacionada con el cambio de la respuesta subjetiva del oído humano. Planteando que esta respuesta es proporcional al cambio fraccional del estímulo E se puede deducir cómo es la respuesta auditiva R del ser humano⁶:

$$\delta R \propto \frac{\delta E}{E} \rightarrow R = K \cdot \log(E) \quad (2.14)$$

El estímulo es debido a variaciones de presión. La expresión deducida demuestra que la respuesta auditiva humana es logarítmica:

$$R = K \cdot \log(E) \rightarrow n \text{ dB} = 20 \cdot \log\left(\frac{P}{P_0}\right) \quad (2.15)$$

La suma de varias fuentes emitiendo a la vez es logarítmica y no aritmética. Esto justifica también la operación de resta logarítmica que se ha definido anteriormente. La suma quedaría entonces definida de la siguiente manera:

$$L_{suma} = 10 \cdot \log\left(\sum_{i=1}^n (10^{L_i/10})\right) \quad (2.16)$$

3 Marco legal

Por lo general, existe un cierto interés legal asociado a las medidas de ruido ambiental. En muchas ocasiones es el motivo principal y único que justifica el estudio acústico de un entorno. Esto se debe fundamentalmente al impacto que el ruido ambiental ha demostrado tener sobre la salud y que ha llevado a la regulación del mismo desde un nivel nacional hasta un nivel de ordenanzas municipales, si las hubiera.

La exposición frecuente a niveles de ruido está asociada a estrés e interrupciones del ciclo del sueño. Estos efectos empeoran a largo plazo, pudiéndose llegar a producir pérdidas de audición si los niveles de exposición son demasiado elevados.

⁶ Fco. Javier Martínez Gómez, Curso de control de ruido y vibraciones, Zaragoza marzo/abril de 2003, Asociación de ingenieros industriales de Aragón - CBR 61

En este apartado se contempla, de manera muy resumida, el tratamiento que da la ley a las medidas de ruido ambiental.

3.1 Legislación pertinente

La legislación pertinente es competencia del Ministerio de Salud y Medio Ambiente. En un principio, la legislación que establece el BOE a nivel nacional es aplicable en todo el territorio nacional, y puede ser expandida por la legislación territorial que exista. La Ley de Ruido aragonesa y la Ley municipal de Zaragoza no hacen ninguna incorporación relevante en el contexto de este trabajo y se limitarían simplemente a recopilar lo que ya menciona la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido.

En dicho texto legal se encuentran definiciones simples de carácter práctico con las que se trabaja en el sector de la acústica tanto industrial como recreativa o de domicilios.

Toda mención al cálculo está referida a estándares internacionales de medida. En concreto, la legislación española está redactada a partir de los acuerdos con la Unión Europea en materia de ruido y proporciona validez legal al Estándar Internacional ISO.

3.2 Definiciones

Aunque el carácter de las medidas a realizar sea puramente experimental, resulta conveniente respetar las definiciones que se recogen en la ley. Algunas de estas definiciones son las que siguen:

- Área acústica*: zona con un mismo objetivo de calidad acústica.
- Calidad acústica*: indicador que determina lo adecuado que es un espacio, considerando sus características acústicas, para llevar a cabo su actividad
- Emisor acústico*: cualquier elemento que emita ondas acústicas (personas, maquinaria, etc).
- Índices acústico*: magnitud que describe los efectos que produce el sonido.
- Índice de emisión*: similar al índice acústico, pero en el contexto de un único emisor particular.
- Índice de inmisión*: indicador para la contaminación acústica que existe en un entorno a lo largo de un cierto tiempo.

Uso del edificio	Tipo de Recinto	Índices de ruido		
		L_d	L_e	L_n
Vivienda o uso residencial	Estancias	45	45	35
	Dormitorios	40	40	30
Hospitalario	Zonas de estancia	45	45	35
	Dormitorios	40	40	30
Educativo o cultural	Aulas	40	40	40
	Salas de lectura	35	35	35

Fig(3.1) – Objetivos de calidad acústica para espacios altamente sensibles. BOE, Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre. Última modificación: 25 de julio de 2012. El subíndice indica el periodo del día al que se aplica. En particular, d corresponde al diurno.

-*Objetivo de calidad acústica*: requisitos que se deben cumplir en un espacio determinado.

A efectos prácticos, la totalidad del recinto de la universidad puede considerarse como área acústica, particularizando a la Facultad de Ciencias.

La ley establece unos objetivos de calidad acústica (ver Fig(3.1)⁷) para espacios docentes de interior, aunque todo apunta y por tanto se asume que corresponden a una situación de actividad nula.

3.3 Estándares internacionales (normativa ISO)

Teniendo en cuenta que la motivación de este trabajo no es legal sino puramente técnica y de carácter docente, lo más acertado es acudir directamente a las normas ISO que contengan los aspectos de relevancia.

Los estándares que describen el ruido ambiente y proporcionan un método para medirlo y tratarlo son las normas *ISO 1996-1* e *ISO 1996-2*, que forman en su conjunto una única norma.

Para describir la instrumentación habilitada para realizar este tipo de medidas no debemos referir a la norma *IEC 61672-1* en la que se describe detalladamente lo que debe ser capaz de hacer el instrumento y cómo tiene que hacerlo. Toda instrumentación que cumpla con esta normativa estará bien indicada por el fabricante.

⁷ Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, pág22 – Boletín Oficial del Estado

Dado que la normativa se establece en base al desarrollo teórico correspondiente la materia a estudiar, es de esperar que las magnitudes definidas en el marco teórico coincidan con lo establecido en estas normas. La norma *ISO 1996-1* establece que las medidas de ruido se darán promediando a tiempo y frecuencia de acuerdo con la $E_c(2.5)$, que es válida para un valor concreto de la frecuencia.

Consultado la norma se comprueban las similitudes y diferencias con el marco teórico más relevantes:

-*Presión de referencia*: son los $20\mu Pa$ ya especificados.

-*Ponderado de frecuencias*: los ponderados estándar son el A y el C, cuyas correcciones asociadas a cada banda de octava vienen bien especificadas.

-*Escala*: los valores de nivel de presión sonora se deben expresar en decibelios, indicando adecuadamente el tipo de ponderación utilizada.

-*Notación*: la notación empleada por la norma difiere con la que se utiliza en este trabajo, que está adaptada al contexto del mismo. La norma define más cantidades que no van a utilizarse aquí y en las que se basa la notación ahí contemplada.

4 Marco técnico

Una vez establecidas las bases teóricas y la motivación que suele haber detrás del tipo de mediciones a realizar, es ya oportuno comentar el instrumental y los recursos informáticos que se puede utilizar para medir y tratar datos.

Merece también la pena comentar aspectos generales asociados al proceso de evaluación de resultados, así como comentar alguna que otra herramienta que puede ser de utilidad en este tipo de problemas, aunque no vaya a usarse en este trabajo.

4.1 Aparato de medida

El instrumento a utilizar es un sonómetro *PCE-322A*. Este modelo presenta las características típicas de los sonómetros empleados por las autoridades para evaluar la calidad acústica de los distintos recintos de interés.

Las características más relevantes de este aparato son:

- Estándar*: IEC61672-1 Type2
- Rango de frecuencias*: (31,5 ~ 8)kHz
- Rango de medición*: (30 ~ 130)dB
- Ponderación*: se aplica A o C sobre las medidas leídas.
- Resolución*: décima de decibelio (0,1dB)
- Rangos de medida*: bajo, medio y alto; más el automático que registra en todo el rango de medición que permite el aparato.
- Precisión*: $\pm 1,4$ dB
- Temperatura de operación*: 0°C - 40°C
- Tiempos de integración*: rápido (125ms) y lento (1s).
- Tiempos de muestreo*: 0,5s y 1s son los utilizados en el trabajo.
- Memoria interna*: hasta 32.000 valores.

Estas especificaciones son más que suficientes para este trabajo. En particular, conviene notar que el aparato funciona de acuerdo con la normativa mencionada anteriormente en el marco legal y normativo.

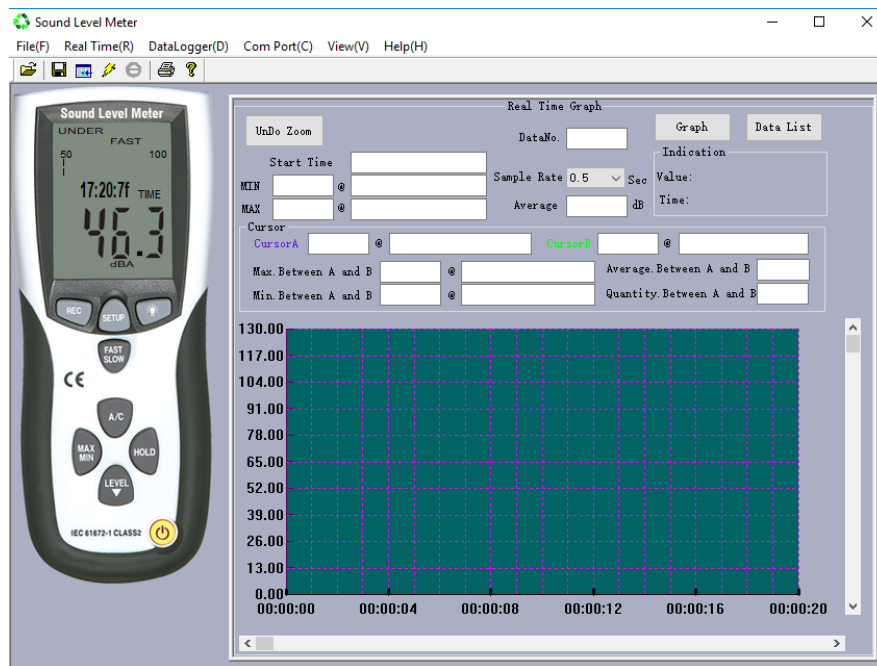
El sonómetro cuenta con conexión USB que permite grabar los valores en memoria o hacer un registro de medidas en tiempo real.

4.2 *Software* y tratamiento de datos. Puesta a punto

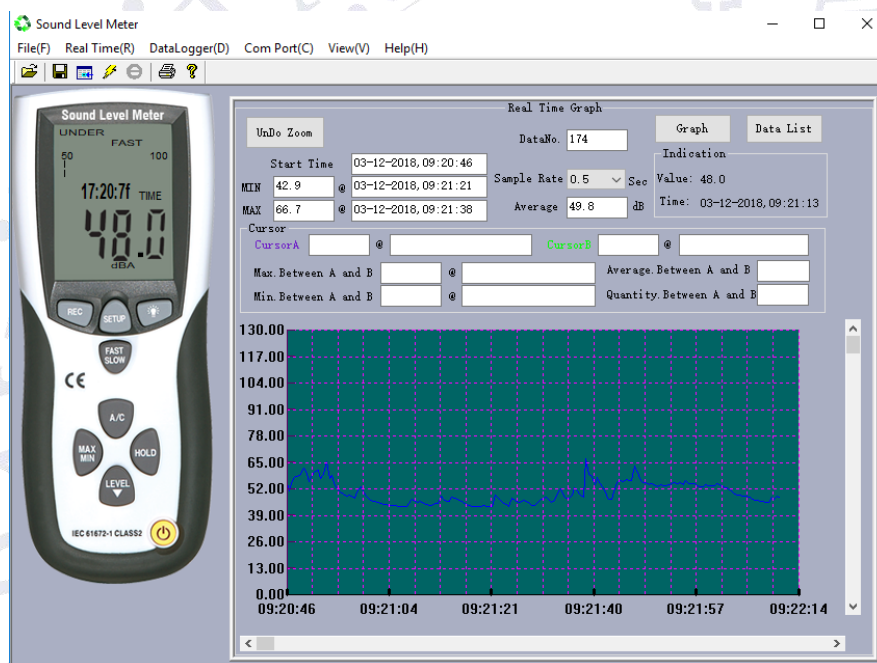
El sonómetro cuenta con su propio *software* que permite visualizar datos y obtener información de los mismos.

La interfaz del programa en cuestión es la que se puede ver en la en la *Fig(4.1)* cuando el sonómetro se conecta con éxito al ordenador. Toda la información que aparece en pantalla del dispositivo se reproduce en la interfaz del programa.

Para comprobar que el sonómetro y el programa funcionan correctamente se hace una medida en tiempo real durante un minuto y medio, aproximadamente. El lugar donde se realiza esta prueba es el pasillo del tercer piso de la facultad de Ciencias.



Fig(4.1) – Interfaz vacía, una vez se establece la conexión con éxito.



Fig(4.2) – Interfaz del programa tras recoger datos en tiempo real.

Se ha utilizado el tiempo de muestreo por defecto (0,5s) y ponderación A. La Fig(4.2) muestra lo que se ve en la interfaz cuando se ha medido. El tiempo de muestreo es lo que indica cada cuánto tiempo se devuelve un valor numérico. Esto tiene un impacto directo sobre el llenado de la memoria que hay que considerar al medir

El valor dentro del recuadro *indication* corresponde a la última posición del puntero dentro de la gráfica. Junto a la gráfica de la evolución temporal se indican también en pantalla los valores máximo y mínimo alcanzados con los tiempos en que se han producido. El promedio (*average*) es aritmético.

Colocando los dos cursores sobre la gráfica se pueden obtener los valores máximo y mínimo junto al promedio aritmético correspondientes a un intervalo concreto de la gráfica. Esto es muy útil cuando hay eventos conocidos y se busca comparar.

Las medidas pueden guardarse directamente como archivo *.txt* y la gráfica puede guardarse como archivo *.pdf* usando la opción de impresión.

El valor máximo o pico correspondería a *Ec(2.9)*, el mínimo a *Ec(2.10)* y el promedio aritmético a *Ec(2.11)*, quedando únicamente por calcular el promedio logarítmico para disponer de los valores con mayor relevancia.

El archivo de texto generado con las medidas se puede exportar a Excel para poder calcular de manera sencilla el nivel de evaluación sonora especificado en la *Ec(2.8)* y que proporciona el promedio logarítmico de las medidas.

El nivel de evaluación sonora de estas medidas prueba es

$$L_{RA,test} = (56,7 \pm 1,4) \text{ dB}(A)$$

El promedio aritmético que se ve en la Fig(4.2) es

$$L_{A,test,avg} = (49,8\text{dB} \pm 1,4) \text{ dB}(A)$$

Inmediatamente salta a la vista la disparidad entre los valores asociados a cada promedio.

Si las medidas se registran con la opción de grabado del sonómetro, sin conexión a ordenador, se usa la función *DataLogger* para recoger los datos y visualizarlos con la interfaz del programa. En una prueba de llenado de memoria se comprueba que el sonómetro es capaz de registrar hasta 32712 valores en memoria, lo que corresponde a 9 horas, 5 minutos y 12 segundos con un tiempo de integración de un segundo.

La siguiente nomenclatura ayudará a tratar los resultados:

-*Fondo*: nivel de presión sonora que puede considerarse característico de un entorno más allá de los eventos que se produzcan.

-*Evento*: cualquier suceso que produzca un aumento localizado y de reducida duración del nivel de presión sonora en un entorno.

-*Evento esperado*: suceso conocido que se pueda identificar sobre el resto de medidas, generalmente porque se espera que ocurra en algún momento determinado mientras se llevan a cabo las medidas.

-*Evento prolongado*: suceso con una duración más larga y que produce un aumento constante del nivel de presión sonora sobre el fondo.

4.3 Criterio de eventos aislados

Si bien es cierto que el conjunto de eventos acústicos es lo que caracteriza la acústica de un entorno, es apropiado preguntarse si algunos de estos eventos, en particular los de mayor intensidad, son hechos aislados y pueden tratarse como tal.

Indicadores como el nivel de evaluación sonora se calculan con el cómputo de todas las medidas y se pueden obtener resultados discrepantes dependiendo de cuándo se mida incluso dentro de un mismo espacio.

Lo que se pretende en este apartado es proponer un método simple que permita asignar un fondo, si fuera posible, a distintos espacios independientemente de los eventos intensos y de baja frecuencia o incluso completamente aleatorios que se produzcan.

La evaluación se puede llevar a cabo comparando el valor mínimo alcanzado y el promedio aritmético de la medida. El valor mínimo podría estar relacionado con el fondo al corresponderse justamente con momento de menor actividad acústica. El promedio puede indicar el valor más común que se ha registrado, estando en teoría fuertemente relacionado con un posible fondo.

Si al comparar ambos valores se encuentra que gozan de un cierto grado de proximidad, se puede asumir que los eventos de mayor intensidad apenas tienen peso sobre el promedio aritmético y son aislados.

Se define y propone el siguiente parámetro para establecer la comparación:

$$\alpha = \frac{L_{AT_n avg} - L_{AT_n min}}{L_{AT_n avg}} \quad \alpha \leq 1 \quad (4.1)$$

La determinación del fondo se calcula como una corrección al promedio aritmético, siendo

$$L_{FA, T_n} = (1 - \alpha)L_{AT_n avg} + \alpha L_{AT_n min} \quad (4.2)$$

Lo más apropiado para decidir si aplicar o no el método será utilizar las gráficas de resultados y evaluar la información que pueda extraerse.

5 Marco práctico

Se cuenta ya con suficientes herramientas para poder medir y analizar resultados. En este apartado se justifica el proceso de medida y se exponen y analizan los distintos resultados.

5.1 Elección de espacios

Dentro de la propia facultad existen espacios mucho más sensibles que otros al contar con una mayor relevancia a nivel docente. Las aulas de la facultad y las zonas destinadas para el estudio son zonas de mayor interés.

En base a ello, se escogen los siguientes espacios:

-*Aula 4*: suponiendo que las aulas gozan de un similar aislamiento cuando se encuentran cerradas, se utiliza esta aula que pudo reservarse para medir durante un periodo de docencia, en horario de mañanas.

-*Aula de lectura*: es un espacio destinado al estudio y por tanto de interés cuando está siendo utilizado.

-*Biblioteca*: de mayores dimensiones que el aula de estudio y con mucha más afluencia, siendo un espacio exigente en términos de calidad acústica.

-*Aula durante un examen*: aunque la celebración de un examen suponga actividad dentro de un aula, es evidente que la calidad acústica durante el mismo es relevante para quienes se están examinando. En concreto, se midió durante el examen de Electrónica Física celebrado en el Aula 5 durante la convocatoria de febrero de 2019.

-*Pasillo*: puede resultar de utilidad medir en el pasillo para comparar con lo que se está midiendo dentro de un aula. En concreto, se mide en el pasillo del tercer piso.

5.2 Proceso de medida y algunas consideraciones

Una vez elegidos los lugares donde medir se debe determinar cómo se va a medir. Se ha mencionado antes que los problemas por directividad de las ondas son algo que está presente a la hora de medir, especialmente con un micrófono tan direccional como lo es el de este sonómetro. No obstante, se dispone de un supresor de viento que aparte de evitar el efecto del viento en exteriores también consigue que el micrófono sea menos directivo.

La posición donde se coloca el sonómetro puede ser también determinante si se coloca cerca de la entrada en los espacios con actividad humana. Se intenta evitar siempre que sea posible.

A continuación, se describen las condiciones en las que se mide en cada uno de los lugares seleccionados:

-Aula 4:

El sonómetro se coloca sobre la tarima, frente a la pizarra y apuntando a los pupitres. No se espera que exista problema alguno por su colocación, dado que el aula permanece cerrada durante todo el tiempo de medición.

Se comienza a medir en torno a las *9h04m* y se termina en torno a las *13h58m*.

-Aula de lectura:

El sonómetro se coloca sobre la mesa de ordenadores que queda a la derecha de la sala conforme se entra. En principio no se registró ningún problema durante las medidas, aunque las conversaciones que mantenían terceros relativamente cerca del aparato durante cortos periodos de tiempo han podido influir sobre los resultados.

Se comienza a medir en torno a las *10h06m* y se termina en tono a las *12h10m*.

-Biblioteca:

El sonómetro se coloca en las mesas próximas a la entrada de la sala de mayor tamaño, lo cual conlleva un mayor registro de la actividad de entrada y salida. Más allá de esta cuestión, no se registra ningún problema durante la toma de medidas.

Se comienza a medir en torno a las *8h59m* y se termina en torno a las *11h29m*.

-Examen de Electrónica Física:

Se elige este examen porque es el primero de la convocatoria y concede más tiempo para realizar el trabajo. El sonómetro se coloca en una esquina del Aula 5, en la parte superior. Se pretende de esta forma evitar la actividad próxima a la tarima del profesor, que apenas se registraría en la zona de pupitres y no afecta demasiado a los examinados.

Se comienza a medir en torno a las *8h53m* y se termina en torno a las *13h50m*.

-Pasillo del tercer piso:

Se mide en las mesas cercanas a los ordenadores instalados en esta misma planta. Es un lugar apropiado para registrar actividad fuera de las aulas, si bien es cierto que algunas aulas no están situadas en zonas de pasillo con el nivel de actividad que se espera en este lugar en concreto.

Se toma en consideración que el aislamiento que pueda existir en un aula está debido en parte a su colocación dentro del edificio y es mejor cuando se evita que colinde con zonas donde hay aglomeración.

Se comienza a medir en torno a las *10h10m* y se termina en torno a las *11h32m*.

—

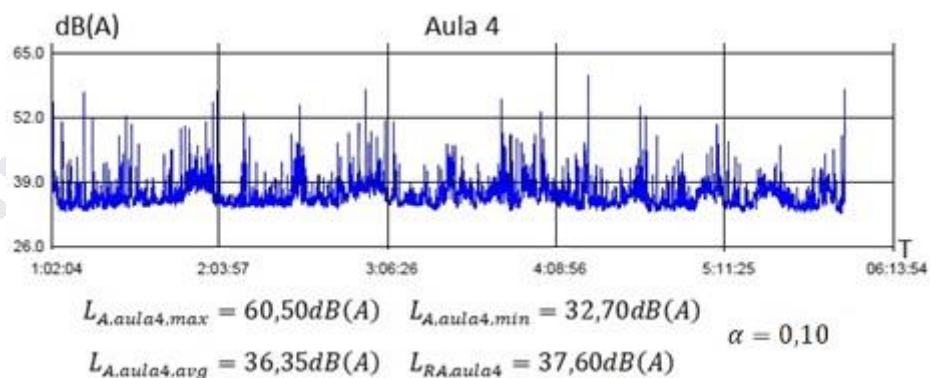
Antes de presentar las gráficas de resultados, se debe tener en cuenta que el sonómetro cuenta con su propio reloj interno que resultó imposible ajustar correctamente y por tanto los tiempos dados son arbitrarios. De todas formas, coinciden en extensión con los proporcionados aquí y no impiden el análisis.

El tiempo de muestreo cuando el aparato funciona sin conexión a ordenador es, por defecto, de un segundo. Resultó imposible cambiarlo y por tanto se mantiene salvo casos en los que el aparato funcionaba con conexión a ordenador (aula de lectura y biblioteca), siendo entonces de medio segundo.

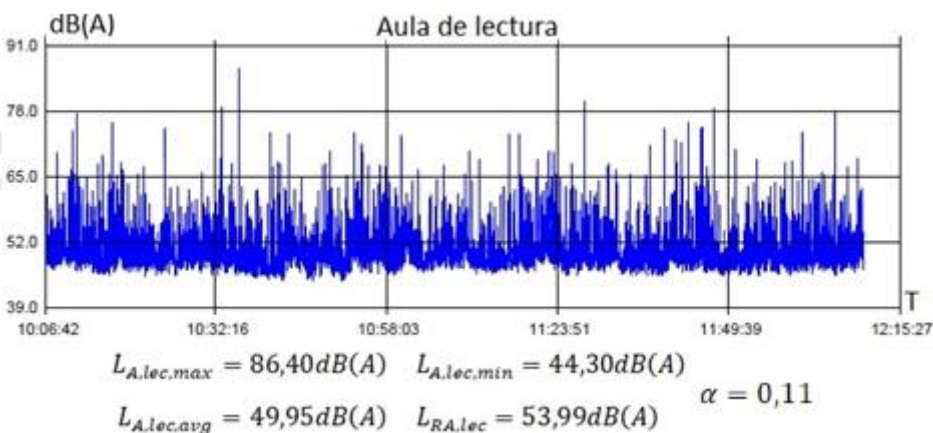
5.3 Resultados

En este apartado se presentan las gráficas de resultados junto con los valores especificados en el marco técnico. El programa especifica el valor máximo y el valor mínimo, así como el promedio aritmético de las medidas.

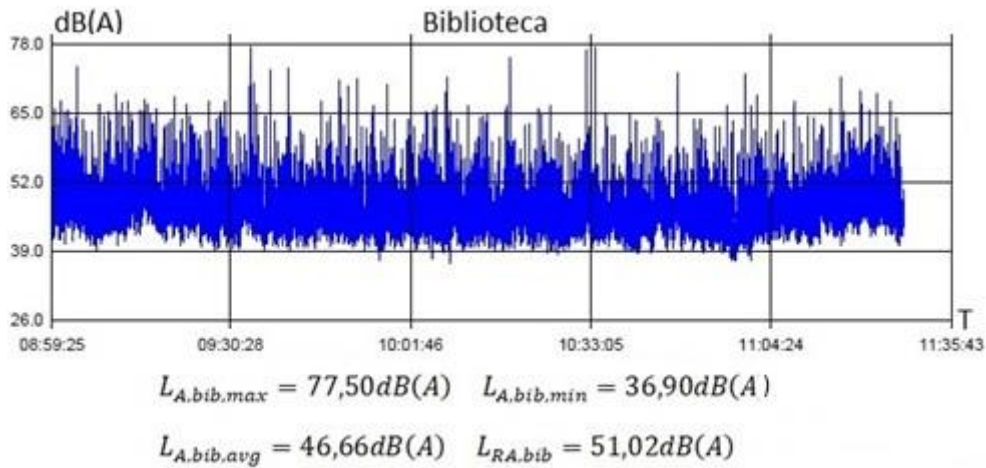
El nivel de evaluación se calcula de acuerdo con la $Ec(2.8)$ y el parámetro α de acuerdo con la $Ec(4.1)$. Al analizar los resultados se discute si es razonable calcular un fondo. Todos los valores llevan asociada una imprecisión de $\pm 1,4dB(A)$.



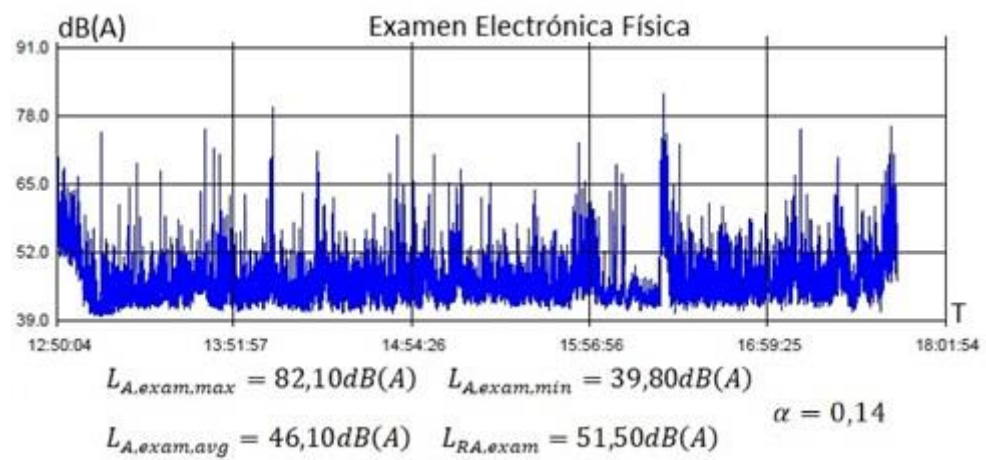
Fig(5.1) – Resultados del Aula 4.



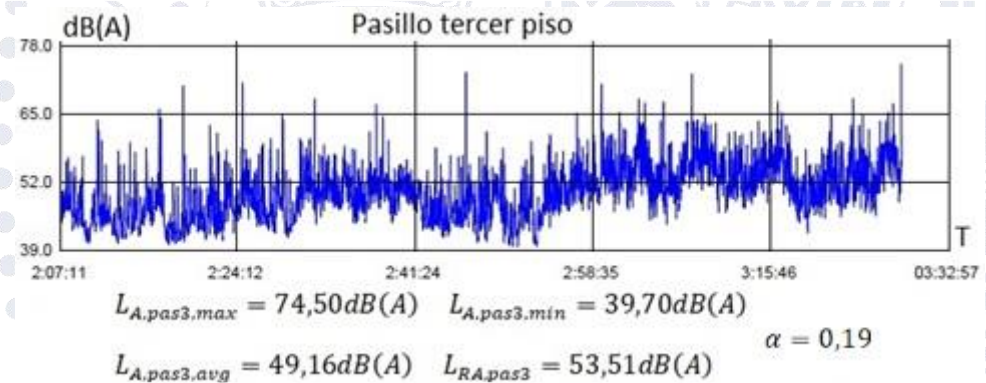
Fig(5.2) – Resultados del aula de lectura.



Fig(5.3) – Resultados de la biblioteca.



Fig(5.4) – Resultados del examen de Electrónica Física.



Fig(5.5) – Resultados del pasillo del tercer piso.

Proporcionar todos los valores individuales de cada medida sería algo inviable debido a la gran cantidad de datos que se generan en este tipo de mediciones. Además, carecería de toda utilidad práctica.

5.4 Análisis y conclusiones

Se analizan ahora los distintos resultados y se discute cuándo merece la pena hablar de un fondo. El parámetro α es fundamental para ello, pero la forma de la gráfica es incluso más determinante.

Los valores máximos corresponden a eventos concretos que no son predecibles. Es por esto que, al ser valores que incluyen cierto grado de arbitrariedad, no se pueden evaluar con demasiado criterio. Es oportuno destacar que valores en torno a los $80\text{dB}(A)$ son elevados y puede que disruptivos incluso si son muy cortos, pero no deberían ser algo frecuente en una facultad.

-Aula 4:

Lo primero que debe notar es que, viendo la *Fig(3.1)*, el nivel de evaluación obtenido queda dentro del margen permitido por la ley.

$$L_{RA,aula4} = (37,6 \pm 1,4) \text{ dB}(A)$$

Por extensión, se puede asumir que en el resto de aulas de la facultad y salas de estudio se obtendría un valor similar.

En particular, en la biblioteca se podría esperar un valor incluso menor al tratarse de un espacio con mayor aislamiento contra la actividad de los espacios comunes.

Mirando la propia gráfica, *Fig(5.1)*, se deduce que los eventos que se han producido, manifestados en forma de picos, son bastante aislados. Los eventos prolongados que se observan pueden estar asociados a la actividad humana más persistente en las inmediaciones del aula.

Aplicando el criterio para eventos aislados con el parámetro que aparece en los resultados de la *Fig(5.1)* se puede deducir, a partir de la *Ec(4.2)*, el siguiente fondo:

$$\alpha = 0,10 \rightarrow L_{FA,aula4} = (36,0 \pm 1,4) \text{ dB}(A)$$

Los valores observados al iniciar y finalizar la medida se corresponden a eventos esperados. Estos son, el salir y entrar en el aula para empezar o terminar las medidas, respectivamente. Su peso sobre el cómputo de todas

las medidas es mínimo y no merece la pena substraerlas en ninguna de las medidas realizadas.

Restando el fondo al nivel de evaluación se tiene que

$$L_{RA,aula4;FA,aula4}^{(log)} = (32,5 \pm 1,4) \text{ dB}(A)$$

Una forma de interpretar este resultado sería decir que la actividad durante el proceso de medida se asemejaría lo que produce una fuente emitiendo con ese mismo valor en decibelios. Este valor en particular es prácticamente imperceptible, por no decir imperceptible, lo que demuestra que este recinto está bastante aislado y preserva su fondo estimado.

-Aula de lectura:

Aplicando el criterio para eventos aislados ($Ec(4.2)$) se obtiene el siguiente fondo:

$$L_{FA,lec} = (49,3 \pm 1,4) \text{ dB}(A)$$

Causas para este fondo son, además de la actividad humana, algún tipo de maquinaria que estaba funcionando en las proximidades durante el proceso de medida. Restándoselo al nivel de evaluación tenemos:

$$L_{RA,lec;FA,lec}^{(log)} = (52,2 \pm 1,4) \text{ dB}(A)$$

Efectivamente, el resultado es mayor cuando existe actividad dentro del propio recinto e incluso si el fondo es ya elevado.

-Biblioteca:

El nivel de evaluación es menor en este recinto si se compara con el aula de lectura. Gran parte de esta diferencia se debe al mejor acondicionamiento que presenta la biblioteca.

La colocación de pelotas de tenis en los pies de las sillas garantiza que el desplazamiento de las mismas deja de ser un foco de eventos. Este tipo de eventos pueden ser más o menos frecuentes dependiendo del día, pero en época de exámenes se puede asegurar con toda certeza que van a producirse con habitualidad.

No parece razonable hablar de un fondo ya que se oscila constantemente entre valores relativamente bajos y valores que son más altos, dando a entender que suceden constantemente eventos no tan aislados y de cierta intensidad. Esto no debe interpretarse como algo negativo, sino como una indicación de que este recinto puede gozar, potencialmente, de una calidad acústica muy buena.

La existencia de un fondo puede perjudicar la calidad acústica de un recinto al introducir un valor intrínseco. Esto no parece suceder en la biblioteca con el tipo de actividad que tiene lugar.

Restando los niveles de evaluación del aula de lectura y la biblioteca:

$$L_{RA,lec;RA,bib}^{(log)} = (50,9 \pm 1,4) \text{ dB}(A)$$

Existe una diferencia notable, consecuencia del mejor acondicionamiento que existe en la biblioteca para el estudio.

-Examen de Electrónica Física:

A parte de apreciarse claramente el comienzo y final de ambas partes del examen junto con el descanso, es posible determinar un fondo.

$$L_{FA,exam} = (45,2 \pm 1,4) \text{ dB}(A)$$

Queda por debajo del que se ha calculado para el aula de lectura, en parte al no haber maquinaria y un intento explícito de reducir la actividad por parte de quienes se examinan.

$$L_{RA,exam;FA,exam}^{(log)} = (50,3 \pm 1,4) \text{ dB}(A)$$

Restando el nivel de evaluación se obtiene un valor que quedaría bastante justificado con la actividad asociada al comienzo y final del examen junto con los eventos que se pueden dar comúnmente durante un examen.

-Pasillo del tercer piso:

Se observa claramente que la actividad no es uniforme y no se puede asociar un fondo a este lugar. Todo dependerá de la actividad que exista en cada momento. No obstante, es razonable afirmar que los espacios cerrados están razonablemente aislados de esta actividad externa.

Merece la pena señalar que hay ciertos eventos esperados que, aunque no se hayan dado durante la toma de medidas, son de particular interés. Una posible obra en las inmediaciones de la facultad o, algo más habitual, el uso de un cortacésped, son algo que puede empobrecer drásticamente la calidad acústica de las aulas.

Tomando en consideración lo que suele suceder cada vez que se da este tipo de actividad, todo apunta a que las ventanas de la facultad, en particular las más antiguas, no son buenos aislantes acústicos. De hecho, pueden incluso vibrar y convertirse ellas mismas en emisores acústicos que definitivamente comprometen la actividad docente, llegando a hacerla prácticamente inviable.

Una forma de medir estos efectos es generar el ruido artificialmente, pero es obvio que esto queda fuera de las posibilidades del trabajo. Un experimento de este tipo puede comprometer el desarrollo habitual de la actividad docente y de investigación, por lo que debe ser planeado, acordado y aceptado con bastante tiempo de antelación.

6 Bibliografía

- http://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_47.html
- <https://www.cirrusresearch.co.uk/blog/2011/08/what-are-a-c-z-frequency-weightings/>
- Enrique J. Sanchís peris, Diploma de Especialización Profesional Universitario en Medición de la Contaminación Acústica, Universidad de Valencia
- Fco. Javier Martínez Gómez, Curso de control de ruido y vibraciones, Zaragoza marzo/abril de 2003, Asociación de ingenieros industriales de Aragón
- Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, Boletín Oficial del Estado
- Real Decreto 1367/2007, de 19 de octubre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas, Boletín Oficial del Estado
- Real Decreto 1513/2005, de 16 de diciembre, por el que se desarrolla la Ley 37/2003, de 17 de noviembre, del Ruido, en lo referente a la evaluación y gestión del ruido ambiental
- Ley 7/2010, de 18 de noviembre, Ley de Contaminación Acústica de Aragón
- http://www.zaragoza.es/ciudad/normativa/detalle_Normativa?id=247
- ISO 1996, Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise (1&2)
- IEC 61672-1:2013, Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications